

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Blašković

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić, dipl. ing.

Student:

Marko Blašković

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se:

Voditelju rada prof. dr.sc. Tanji Jurčević Lulić na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Posebno bih želio zahvaliti svojoj obitelji - roditeljima Željku i Branki te bratu Luki na razumijevanju, potpori i pomoći kako tijekom izrade ovog rada, tako i tijekom cijelog studija.

Također zahvaljujem svojim kolegama i prijateljima na potpori i pomoći tijekom svih ovih godina studiranja.

Marko Blašković

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	2
POPIS TABLICA.....	3
POPIS OZNAKA	4
SAŽETAK.....	5
SUMMARY	6
1. UVOD	7
1.1. Vanjsko uho.....	7
1.2. Unutarnje uho	9
2. SREDNJE UHO	10
2.1. Anatomija srednjeg uha	10
2.2. Dimenzije i mehanička svojstva dijelova srednjeg uha.....	13
2.3. Zvuk.....	15
2.3.1. Karakteristična impendancija i zvučni tlak	15
2.3.2. Intenzitet zvuka	16
2.4. Prijenos zvuka kroz uho	18
3. ANALIZA SREDNJEG UHA POMOĆU METODE KONAČNIH ELEMENATA	22
3.1. Postupak konstruiranja 3D modela.....	23
3.2. Rezultati analize	24
ZAKLJUČAK	27
4. LITERATURA.....	28

POPIS SLIKA

Slika 1.	Slušni kanal [1]	7
Slika 2.	Uška [2]	8
Slika 3.	Unutarnje uho [4]	9
Slika 4.	Srednje uho [5]	10
Slika 5.	Slušne koščiце [6]	11
Slika 6.	Čekić [7]	12
Slika 7.	Nakovanj [8]	13
Slika 8.	Stremen [9]	13
Slika 9.	Shematski prikaz zvuka kao tlačnog vala [10]	16
Slika 10.	3D prikaz putujućeg vala u bazilarnoj membrana pužnice [10]	18
Slika 11.	2D prikaz odjeka za putujuće valove različitih frekvencija [2]	19
Slika 12.	Mehanizmi koji povećavaju tlak zvuka [10]	20
Slika 13.	HRCT slika ljudske sljepoočne kosti uključujući bubnjić (1) i slušne koščiće: čekić (2), nakovanj (3) i stremen (4) [11]	22
Slika 14.	3D model slušnih koščica srednjeg uha sa mrežom konačnih elemenata [11]	23
Slika 15.	Usporedba rezultata metode konačnih elemenata s rezultatima eksperimenta za umbo bubnjića [11]	25
Slika 16.	Usporedba rezultata metode konačnih elemenata s rezultatima eksperimenta za stremen [11]	25

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Fizikalne karakteristike zvučnog kanala [10].....	13
Tablica 2.	Fizikalne karakteristike bubnjića [10].....	13
Tablica 3.	Fizikalne karakteristike srednjeg uha [10]	14
Tablica 4.	Fizikalne karakteristike pužnice [10]	14
Tablica 5.	Mehanička svojstva dijelova srednjeg uha [6]	14
Tablica 6.	Razine intenziteta zvuka [10]	17

POPIS OZNAKA

VELIČINE JEDINICA

A_1	m^2	- površina bubnjića
A_2	m^2	- površina ovalne ploče stremena
c	m/s	- brzina zvuka
C		- matrica prigušenja
d_1	m	- držak čekića
d_2	m	- poluga nakovnja
F_1	N	- sila na bubnjiću
F_2	N	- sila na ovalnu ploču stremena
f		- nodalni vektor sile
fs		- vektor tlaka fluida koji opisuje interakciju fluida i bubnjića
G	Pa	- povećanje tlaka
I	W/m^2	- intenzitet zvuka
I_0	W/m^2	- referentni intenzitet
k		- broj valova
K		- matrica krutosti
M		- matrica mase
p	Pa	- tlak zvučnog vala
P	Pa	- zvučni tlak
T		- udio zvuka koji se prenosi na dodiru između zraka i vode
u		- vektor pomaka
Z	$\frac{kg}{m^2s}$	- karakteristična impendancija medija
y	m	- pomak
α		- parametar prigušenja
β	dB	- jačina zvuka
Γ		- udio zvuka koji se reflektira na dodiru između zraka i vode
δ		- parametar prigušenja
ξ	m/s	- efektivna vrijednost brzine čestice
ρ_0	kg/m^3	- gustoća fluida
ω	rad/s	- kutna frekvencija

SAŽETAK

Naslov završnog rada je „Biomehanika Srednjeg Uha“. Ljudsko srednje uho je mehanički sustav za prijenos zvuka iz vanjskog u unutarnje uho. U početnom dijelu završnog rada govori se o anatomiji srednjeg uha. Detaljno su opisani dijelovi srednjeg uha: slušne koščice (čekić, nakovanj i stremen) i membrana bubnjića te njihova funkcija u ljudskom tijelu. Također ukratko je opisano vanjsko i unutarnje uho pošto su usko vezani za funkciju srednjeg uha. U nekoliko tablica iznesene su najvažnije dimenzije i mehanička svojstva djelova srednjeg uha. Iz literature [10] su uzeti i pomaci membrane bubnjića na pragu sluha.

Zvuk je naša percepcija podražaja nastalog kao poremećaj tlaka u mediju. Bubnjić vibrira pod utjecajem zvuka, a slušne koščice predstavljaju polužni sustav s nejednakim krakovima što uzrokuje povećanje zvučnog tlaka. U drugom dijelu rada govori se općenito o zvuku i načinu na koje naš mozak pomoću srednjeg i unutarnjeg uha interpretira zvuk. Pojašnjeni su neki osnovni pojmovi kao što su zvučni tlak, karakteristična impendancija i intenzitet zvuka koji su nužni za razumjevanje tematike. Prikazana je tablica u kojoj su pokazani različiti intenziteti zvuka koje možemo čuti u prirodi i okolišu. Domet ljudskog sluha seže kroz čak 12 redova veličine. Jedan od ciljeva ovog završnog rada je izračunati sile u ovalnoj ploči stremena za minimalni prag čujnosti (zvučni tlak na membrani bubnjića $20 \cdot 10^{-6}$ Pa) i normalnu razinu govora od 60 dB (zvučni tlak na membrani bubnjića $25 \cdot 10^{-3}$ Pa). Sila na ovalnoj ploči stremena za minimalni prag čujnosti iznosi $F'_1 = 1,5$ nN, a za normalnu razinu govora $F'_2 = 1,95$ nN. Ti iznosi sila dokazuju nevjerojatnu osjetljivost ljudskog srednjeg uha.

U posljednjem dijelu rada se govori o izradi 3D modela pomoću metode konačnih elemenata. Srednje uho se prvo treba slikati HRCT metodom te se onda ti podaci (dimenzije i geometrija) ubacuju u računalo. Nakon toga se na računalu radi mreža konačnih elemenata za 3D model srednjeg uha. Usporedba podataka dobivenih metodom konačnih elemenata i eksperimentalnom metodom prikazana je na slici 15. i 16.

SUMMARY

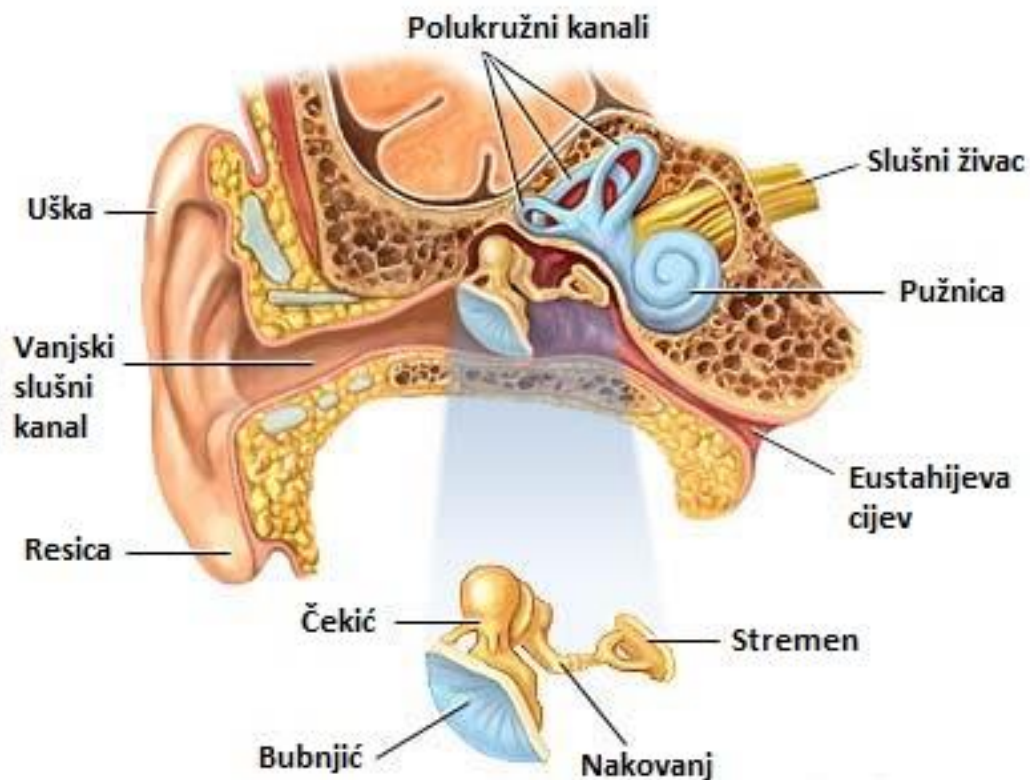
The title of this final thesis is „Biomechanics of the middle ear“. Human middle ear is a mechanical system for sound transfer from outer to inner ear. Anatomy of middle ear is described in first part of this thesis. Parts of middle ear, ossicular chain (malleus, incus, stapes) and eardrum membrane, are described in detail as well as their function in the human body. Outer and inner ear are shortly described because of their close connection to middle ear. The most important dimensions and mechanical properties of the middle ear are given in several tables. Displacement of eardrum membrane on the minimum audible threshold are taken from literature [10].

Sound is our perception of stimulation which originates as disruption of pressure in medium. Eardrum vibrates under influence of sound, and ossicular chain represents leverage system with unequal handles which results in acoustic pressure gain. Sound in general and the way our brain interpretes sound with help from inner and middle ear are described in second part of this thesis. Some of the basic terms which are necessary for understanding of this problem like acoustic pressure, characteristic impedance and sound intensity are also described. There is a table with different sound intensities from our environment. Range of human hearing spans 12 orders of magnitude. One of the goals of this final thesis was to calculate forces on stapes footplate for minimum audible threshold (acoustic pressure on eardrum membrane of $20 \cdot 10^{-6}$ Pa) and for normal speech level of 60 dB (acoustic pressure on eardrum membrane of $25 \cdot 10^{-3}$ Pa). The force on stapes footplate for minimum audible threshold is $F'_1 = 1,5$ nN and for normal speech level $F'_2 = 1,95$ nN. These force figures show us incredible sensibility of human middle ear.

Construction of 3D finite element model is discussed in the last part of this thesis. After HRCT scan of the middle ear, data (dimensions and geometry) is transferred to computer. After that finite element mesh is created for 3D middle ear model. Comparison of results from finite element analysis and experimental analysis are shown in figure 15. and 16.

1. UVOD

Uho (Slika 1.) je vrlo složen organ koji, osim sluha, osigurava i ravnotežu. Sastoji se od tri dijela: vanjskog (lat. *auris externa*), srednjeg (lat. *auris media*) i unutarnjeg (lat. *auris interna*) uha te dva dijela osmog moždanog živca. Slušni kohlearni živac provodi zvučne podražaje, a statični, vestibularni živac podražaje koji nastaju uslijed promjene položaja i pokreta glave. Vanjsko i srednje uho su pomoćni organi koji su odgovorni za prihvaćanje i provođenje zvučnih valova do unutrašnjeg uha.

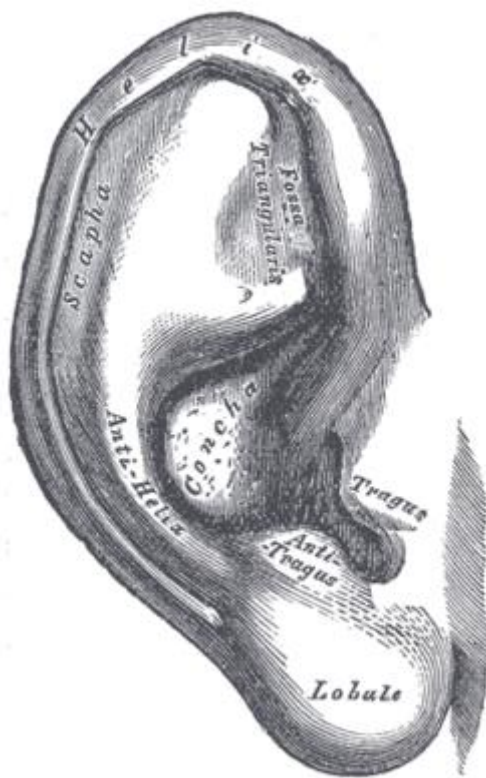


Slika 1. Slušni kanal [1]

1.1. Vanjsko uho

Vanjsko uho obuhvaća ušku (Slika 2.) i zvukovod ili vanjski slušni kanal. Uška ne priliježe potpuno uz glavu već se između uške i glave nalazi kut koji se naziva cefalaurikularni kut. Ako je taj kut velik govorimo o odstojećim uškama ili klempavosti. Zbog karakterističnog reljefa ušku nazivamo i ušna školjka. Osnovu toga reljefa oblikuje hrskavica uške obložena kožom. Rub uške koji je savijen naziva se *helix*. Na gornjem kraju uške, na *helixu*, može se nalaziti kvržica. Drugi nabor nalazi se paralelno s *helixom*, s njegove unutarnje strane i naziva se *antihelix*. Brazda između tih nabora naziva se *scapha*. *Antihelix* se na gornjem kraju dijeli na dva kraka. Između njih se nalazi udubina *fossa triangularis*. Ispred

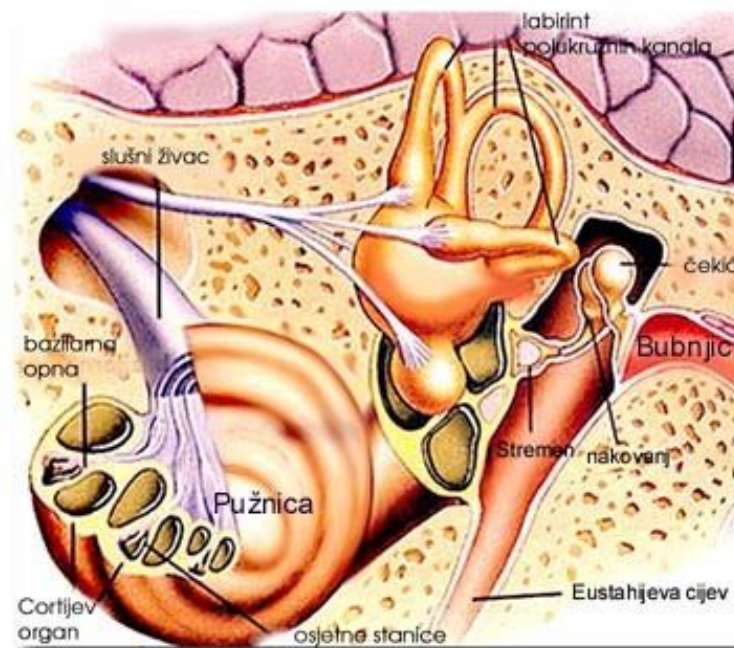
i unutar *antihelixa* se nalazi udubina, *conchoa auriculae*. Na prednjem dijelu uške je izbočina *tragus*, a iza *tragusa* druga izbočina *antitragus*. Donji kraj uške koji spaja čeljust i vanjsko uho naziva se resica uške. Uška izvodi brojne važne funkcije, uključujući prvu od brojnih transformacija otpora, pojačavanje zvuka i njegovo usmjeravanje. Transformacija otpora zvuka je potrebna da bi mozak mogao točno interpretirati određeni zvuk. Naš smisao za usmjerenost određen je diferencijalnim vremenom dolaska zvuka na vanjskom uhu u sprezi s razlikom u vremenima dolaska zvuka i glasnoćom na slušnoj cjelini mozga. Naborani oblik uške omogućuje bolji prijem i određivanje pravca zvučnih valova. Vanjski slušni kanal je blago vijugav kanal dužine oko 25 mm, pruža se do srednjeg uha. Sastoji se od hrskavičnog ili membranskog te koštanog dijela. Početni, latelarni dio zvukovoda prolazi kroz hrskavični kanal koji se nastavlja na hrskavicu uške. Medijalni dio zvukovoda prolazi kroz koštani kanal koji je dulji od membranskoga. Dugačak je oko 16 milimetara. Uzdužna os koštanoga i membranskoga zvukovoda čini kut koji je otvoren prema dolje i naprijed. Na medijalnome kraju koštanoga zvukovoda nalazi se žlijeb, u koji je uložen bubnjić. Bubnjić predstavlja granicu između vanjskog i srednjeg uha. On nije postavljen okomito na zvukovod već koso pod nagibom od 45° tako da je zvukovod najdublji u prednjem donjem dijelu. Zvukovod je prekriven vrlo tankom kožom ispod koje nema masnog tkiva. Oko ulaza u zvukovod nalaze se žlijezde znojnice i dlačice. Žlijezde koje luče ušnu smolu, nalaze se u membranskome i stražnjem gornjem dijelu koštanog zvukovoda.



Slika 2. Uška [2]

1.2. Unutarnje uho

Unutarnje uho (Slika 3.) je veoma složene građe. Zbog svog izgleda naziva se i labirint u kome su smješteni meki, opnasti dijelovi unutrašnjeg uha. Sastoji se od koštanog i membranskog dijela. Koštani labirint čine tri dijela: pužnica, predvorje i polukružni kanali. Pužnica je tekućinom ispunjena komora gdje se kretanje tekućine stanicama dlačica pretvara u potencijalni rad živaca. Svaka stanica dlačica ima tanka cilindrična tijela proteina, zvana treplje, koje nastaju na jednom kraju, 30000 ovih stanica dlačica, složenih u četiri reda, spojeno je na vrh bazilarne membrane u matricu stanica zvanom Cortijev organ. One funkcioniraju kao minijturni pretvarači koji reagiraju na pomake bazilarne membrane u odnosu na *perilimfu*. Otklon dlačica u jednom smjeru povećava oslobađanje kemijskih odašiljača, dok otklon u drugom smjeru sprječava njihovo oslobađanje. Varijacije u koncentraciji ovog kemijskog odašiljača mijenjanju brzine pražnjenja obližnjih neurona koji čine spiralni ganglij. Promjene u ovoj živčanoj aktivnosti prenose se do mozga slušnim živcem. Pužnica se sastoji od tri spiralna kanala, od kojih su dva odvojena bazilarnom membranom koja je dio Cortijevog organa. Bazilarna membrana, koja se širi i postaje sve više nepokretna kako se pužnica sužava prenosi vibracijski pokret duž njene dužine kao putujući val (poput pucajućeg užeta). Amplituda ovog vala doseže maksimum na mjestu koje ovisi o frekvenciji. Maksimumi visoke frekvencije pojavljuju se prema dnu bazilarne membrane, sve do 20 kHz (gdje je membrana najkruća i najuža) dok se niskofrekventni maksimumi javljaju prema vrhu, sve do 20 Hz [3]. Ovaj prostorni odnos s osjetljivošću frekvencije zove se tonotopička organizacija. Vanjske stanice dlačica na bazilarnoj membrani također obavljaju kontraktilnu funkciju (aktinska vlakna) i služe kao kontrolna pojačala za unutrašnje stanice dlačica, koji šalju signale do slušnog korteksa preko spiralnog ganglija. Gubitak vanjskih stanica dlačica rezultira gubitkom sluha od 60 dB [3].

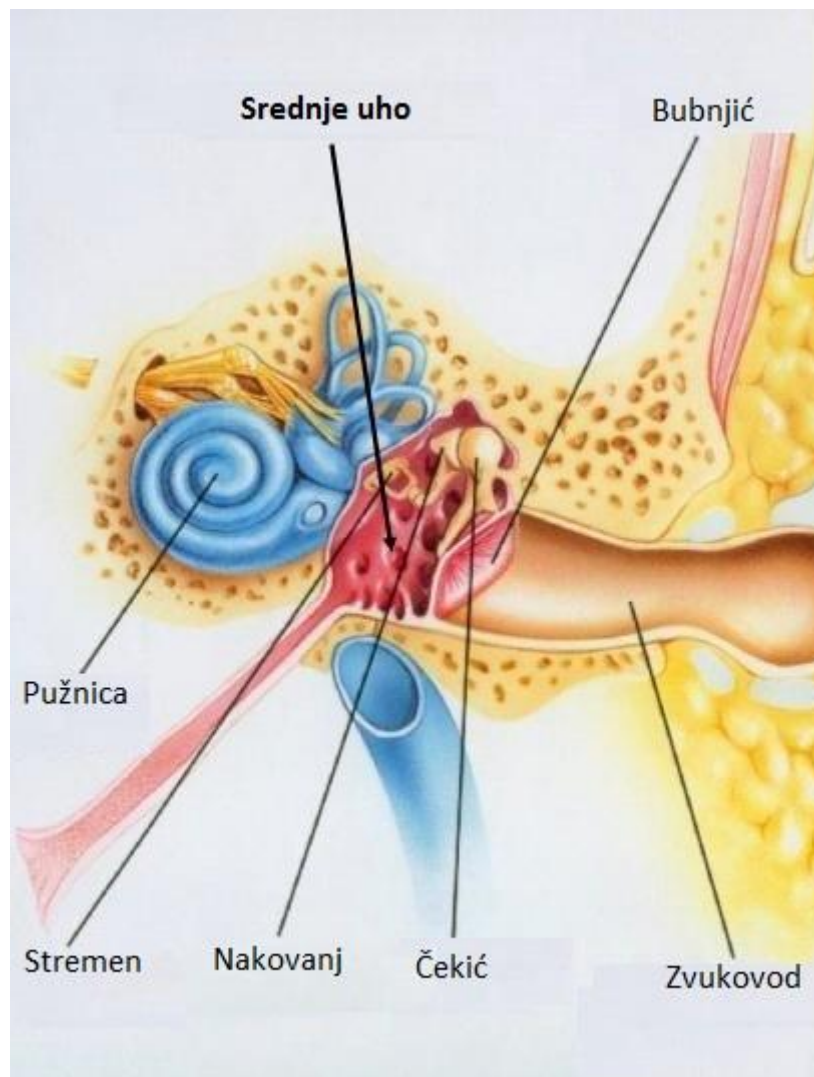


Slika 3. Unutarnje uho [4]

2. SREDNJE UHO

2.1. Anatomija srednjeg uha

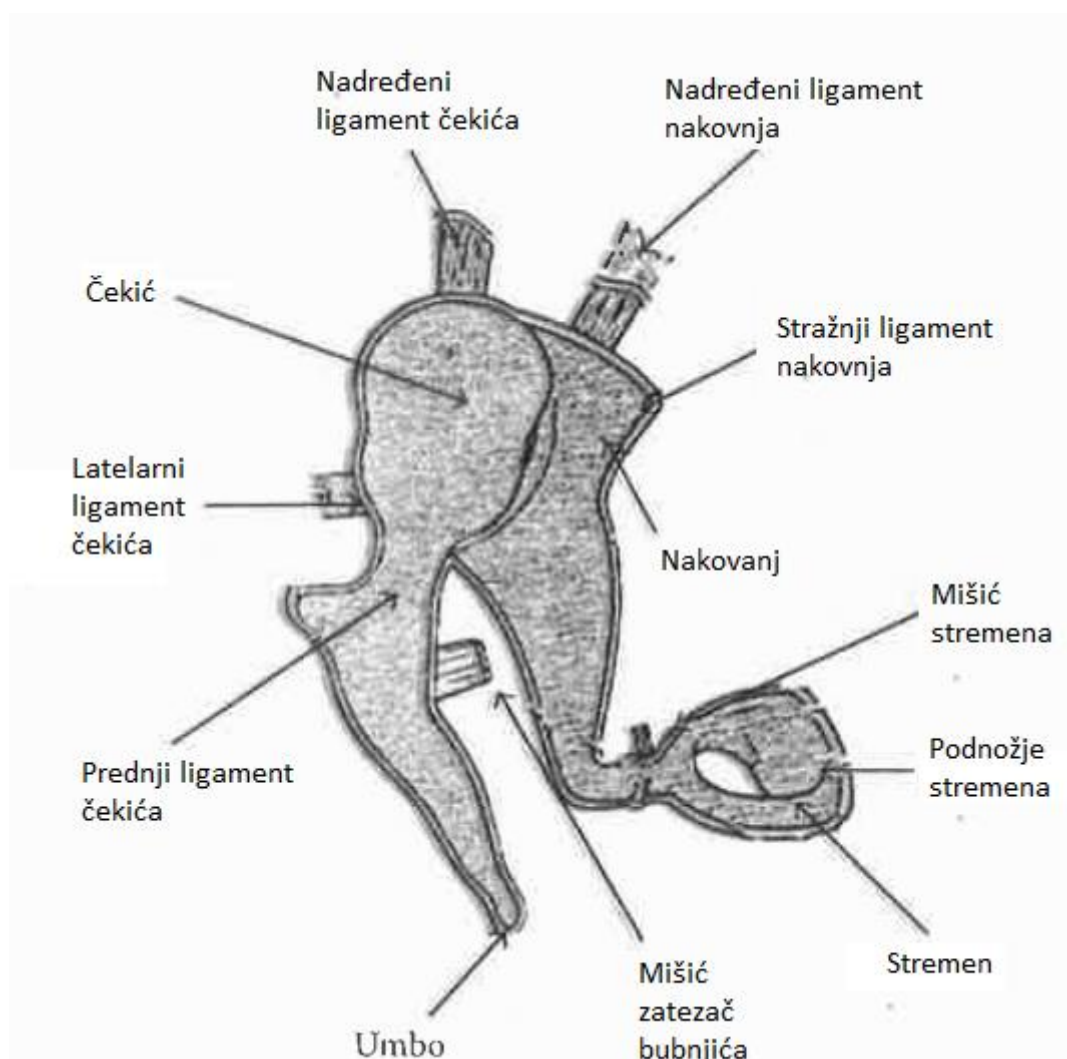
Srednje uho (Slika 4.) izgrađuje složen sistem međusobno povezanih šupljina koje su uglavnom smještene u sljepoočnoj kosti. Sve šupljine srednjeg uha ispunjene su zrakom. Središnji dio srednjeg uha naziva se bubnjište. Ono je bubnjićem odijeljeno od zvukovoda. Prema natrag na bubnjište se nadovezuju pneumatski prostori srednjeg uha, a Eustachieva cijev spaja prednji dio bubnjišta sa gornjim dijelom ždrijela.



Slika 4. Srednje uho [5]

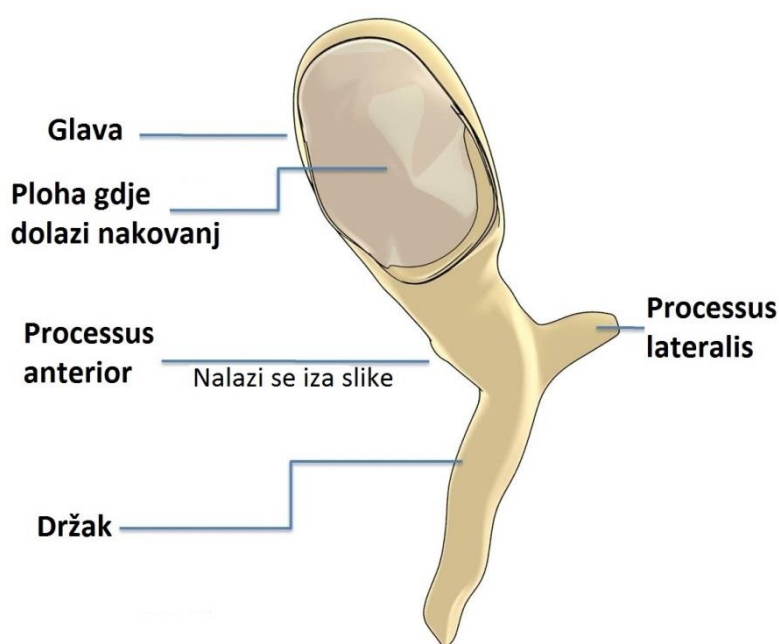
Bubnjište se dijeli u tri dijela. Dio bubnjišta koji je u razini s bubnjićem naziva se *mesotympanum*. Iznad razine bubnjića nalazi se *epitympanum* ili atik, a ispod *hypotympanum*. Medijalna stijenka bubnjišta okrenuta je prema unutrašnjem uhu. Na njoj se nalazi ovalni otvor. Taj otvor zatvara pločica stremena. Ispod otvora nalazi se *promontorij*, tj. izbočenje

bazalnog zavoja pužnice, a ispod *promontorija* nalazi se okrugli otvor. Iznad i iza ovalnoga otvora nalazi se kanal kroz koji prolazi lični živac. Lateralni polukružni kanal izbočuje se iznad ličnog živca. Iznad i iza lateralnog polukružnog kanala nalazi se ulaz u antrum mastoida (dio sljepoočne kosti gdje se nalazi zrak). Gornju stijenku bubnjišta prema srednjoj lubanjskoj jami čini tanka pločica. Donja stijenka dijeli bubnjište od unutrašnje vratne vene. Prednja stijenka bubnjišta ljevkasto se suzuje u ušće Eustachieve cijevi. Na ušću se iznad toga otvara i kanal u kojem je hvatište mišića zatezača bubnjića. Bubnjić dijeli bubnjište od zvukovoda. Zbog navlačenja drška prema unutra, bubnjić ima ljevkast oblik. Mjesto na kojem se držak čekića drži za bubnjić tijekom snimanja uha ima oblik nabora. Ispod nabora nalazi se najjuvčeni dio bubnjića koji se naziva *umbo*. Manji dio bubnjića iznad ispupčenog dijela bubnjića naziva se *Shrapnellova membrana*, za razliku od ostaloga napetoga dijela bubnjića. Bubnjić ima tri sloja. Vanjski sloj čini koža koja se nastavlja na kožu zvukovoda. Srednji sloj se sastoji od sloja čvrstoga fibroznoga tkiva. Niti u vanjskom sloju postavljene su radijalno, a u unutarnjem sloju cirkularno. Unutarnji sloj je epitel koji se nastavlja na epitel sluznice bubnjišta. *Shrapnellova membrana* nema srednji fibrozni sloj, pa tu koža izravno dodiruje sluznicu.

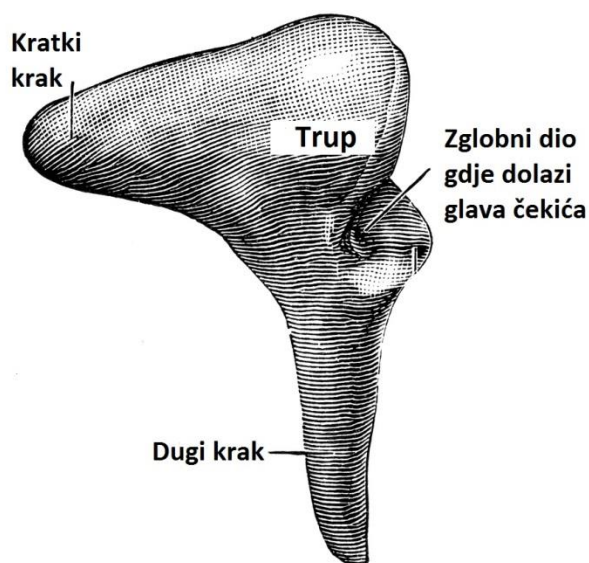


Slika 5. Slušne koščiце [6]

Tri slušne koščice (Slika 5.) u srednjem uhu su čekić, nakovanj i stremen. Čekić (Slika 6.) se sastoji od glave, ispod koje se nalazi vrat, a najdonji dio je držak. S čekića odlaze dva nastavka. Prema latelarno ide *processus lateralis* koji na bubnjiću stvara izbočinu. *Processus anterior* ide prema naprijed. Držak je spojen s bubnjićem, a glava čekića je preko sedlaste površine uzglobljena s nakovnjem. Nakovanj (Slika 7.) se sastoji od trupa i dva kraka. Kratki krak usmjeren je prema natrag. Drugi krak završava nastavkom koji je uzglobljen s glavicom stremena. Stremen (Slika 8.) se sastoji od glave, vrata, prednjeg i stražnjeg kraka te podnožja. Glava je uzglobljena s nakovnjem, a bazom stremena zatvoren je ovalni otvor prema unutarnjem uhu. Ako se zvukovi prejaki kontrahiraju se dva mišića u srednjem uhu koji pritom fiksiraju lanac slušnih koščica i time smanjuju prijenos tih zvukova.



Slika 6. Čekić [7]



Slika 7. Nakovanj [8]



Slika 8. Stremen [9]

2.2. Dimenzije i mehanička svojstva dijelova srednjeg uha

Za proračun bilo kojeg dijela srednjeg uha potrebni su nam dimenzije i mehanička svojstva srednjeg uha. U sljedećim tablicama prikazani su ti podaci. Da bi dobili perspektivu o nevjerojatnoj osjetljivosti uha, uzmimo u obzir da je opseg atoma vodika $5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ (Bohrov opseg), što je pet puta veće od potrebnog pomaka bubnjića na pragu sluha [10].

Tablica 1. Fizikalne karakteristike zvučnog kanala [10]

Poprečni presjek	$0,3 - 0,5 \text{ cm}^2$
Promjer	$0,7 \text{ cm}$
Duljina	$2,7 \text{ cm}$
Volumen	1 cm^3

Tablica 2. Fizikalne karakteristike bubnjića [10]

Površina	$0,5 - 0,9 \text{ cm}^2$ (približno obliku kružnice)
Debljina	$\approx 0,1 \text{ mm}$
Pomak	10^{-8} mm (prag sluha na 1 kHz) 10^{-1} mm (prag nelagode, niskofrekventni tonovi)

Tablica 3. Fizikalne karakteristike srednjeg uha [10]

Ukupni volumen	2cm ³
Čekić	23mg , 8–9mm duljine
Nakovanj	27mg , 5mm×7mm
Stremen	3–4mg , 3,5mm visine, ovalna ploča 1,4×3,2mm

Tablica 4. Fizikalne karakteristike pužnice [10]

Duljina	35mm (kanali pužnice)
Bubnjični kanal	1mm visine
Okrugli prozor	2mm ²

Tablica 5. Mehanička svojstva dijelova srednjeg uha [6]

Naziv	Gustoća (kg/m ³)	Modul elastičnosti (Pa)
Čekić		
Glava	2,55·10 ³	1,41·10 ¹⁰
Vrat	4,53·10 ³	1,41·10 ¹⁰
Držak	3,7·10 ³	1,41·10 ¹⁰
Tijelo	2,36·10 ³	1,41·10 ¹⁰
Nadređeni ligament	2,5·10 ³	4,9·10 ⁴
Latelarni ligament	2,5·10 ³	6,7·10 ⁴
Prednji ligament	2,5·10 ³	2,1·10 ⁶
Nakovanj		
Kratki krak	2,26·10 ³	1,41·10 ¹⁰
Dugi trak	5,08·10 ³	1,41·10 ¹⁰
Nadređeni ligament	2,5·10 ³	4,9·10 ⁴
Stražnji ligamnet	2,5·10 ³	6,5·10 ⁵
Stremen	2,2·10 ³	1,41·10 ¹⁰
Mišić natezač bubnjića	2,5·10 ³	2,6·10 ⁶
Mišić stremena	2,5·10 ³	5,2·10 ⁵
Pužnica		60

2.3. Zvuk

Zvuk je naša percepcija podražaja nastalog kao poremećaj tlaka u mediju. Zanimljivo je razumjeti prirodu zvuka prije no što se uzme u obzir njegova interakcija sa slušnim sustavom. Za razliku od elektromagnetskog zračenja, koje se može širiti prostorom, zvučni valovi prenose se naizmjeničnim sabijanjem i širenjem zraka (ili nekog drugog posrednika) koji se šire u smjeru nagiba, kao što je prikazano shematski na slici 9. Ove promjene tlaka su malene. Na primjer, jako glasan zvuk može uzrokovati promjenu tlaka od 20 Pa, što uzrokuje lokaliziranu promjenu atmosferskog tlaka od samo 0.02% [10].

2.3.1. Karakteristična impendancija i zvučni tlak

Kako se zrak širi nekim posrednikom, svaki mali element čestice tog posrednika oscilira oko svog ravnotežnog položaja. Za čisto harmonijsko gibanje, pomak y je

$$y = y_m \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \quad (2.1)$$

Gdje je y pomak, y_m amplituda (maksimalni pomak), λ valna duljina, x fazni pomak, c brzina zvuka te t vrijeme.

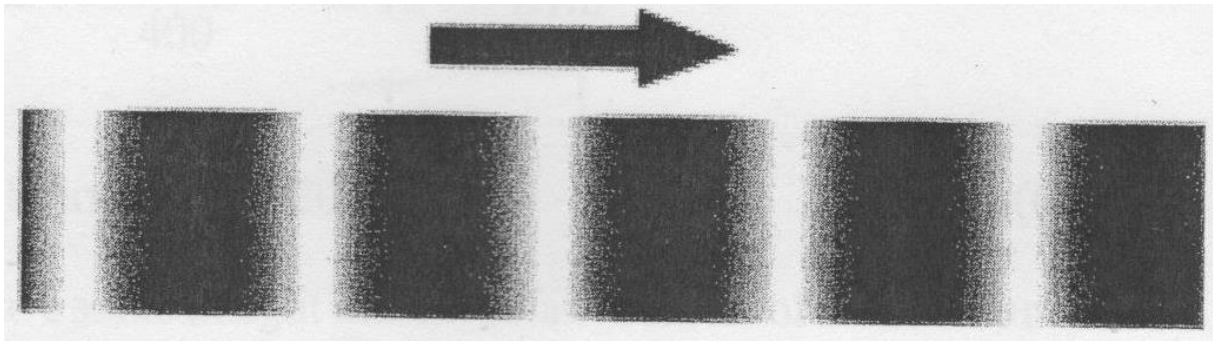
Može se pokazati da je tlak zvučnog vala p :

$$p = (k \rho_0 c^2 y_m) \sin(kx - \omega t) \quad (2.2)$$

gdje je $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ valni broj, ρ_0 gustoća zraka, c brzina zvuka i ω kutna frekvencija.

Amplituda vala je zvučni tlak $p_m = k \rho_0 c^2 y_m$, tako da se zvučni val može smatrati tlačnim valom sa faznim pomakom od 90° . Tlak se u bilo kojem trenutku mijenja sinusoidalno s vremenom, oko srednje vrijednosti, i srednja vrijednost (RMS) ove promjenjive komponente poznata je kao zvučni tlak P . Može se izmjeriti koristeći pravilno podešen mikrofon. Karakteristična impendancija medija Z definirana je kao omjer akustičnog tlaka i efektivne vrijednosti brzine čestica ξ , kako je i opisano u jednadžbi 2.3 Bitno je razumjeti da ovo nije brzina vala.

$$Z = \frac{P}{\xi} \quad (2.3)$$



Slika 9. Shematski prikaz zvuka kao tlačnog vala [10]

Ovo je složena veličina, ali za širenje u idealnom mediju (bez gubitka) Z je realan i svodi se na faktor proporcionalnosti koji je jednak intenzitetu kvadrata akustičnog tlaka.

$$Z = \rho_0 c \quad (2.4)$$

Za zrak je $\rho_0 = 1,3 \text{ kg/m}^3$ i $c = 332 \text{ m/s}$, te karakteristična impendancija za zrak iznosi $Z_z \approx 400 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Za vodu je $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ i $c = 1400 \text{ m/s}$, a karakteristična impendancija iznosi $Z_v = 1,4 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Ova velika razlika u karakterističnoj impendanciji dva posrednika zahtjeva da uho izvede učinkovitu transformaciju impendancije kako bi se prijenos snage doveo do maksimuma dok zvuk putuje od vanjskog do unutarnjeg uha. Udio zvuka koji se reflektira na dodiru između zraka i vode dobivamo putem

$$\Gamma = \left(\frac{Z_v - Z_z}{Z_v + Z_z} \right)^2 \quad (2.5)$$

Udio koji se prenosi T je ostatak

$$T = 1 - \Gamma = \frac{4Z_v Z_z}{(Z_v + Z_z)^2} = 0,0011 \quad (2.6)$$

Stoga, kada bi vanjsko i unutarnje uho bilo odvojeno samo membranom bez slušnih košćica, samo bi maleni dio zvuka prošao. Mehanizam koji izjednačava impendanciju te uvećava prijenos akustične snage do unutarnjeg uha, pojašnjen je dalje u poglavlju.

2.3.2. Intenzitet zvuka

Intenzitet zvuka je količina energije koja prostruji kroz plohu površine 1 m^2 , postavljenu okomito na smjer širenja zvuka, u jednoj sekundi. Definiran je kao prenesena snaga po jedinici površine, odnosno kao razina zvučnog tlaka (SPL – *sound pressure level*), i može se

prikazati izrazom akustične impendancije jednadžbom sličnom ohmovom zakonu za strujne krugove. Potrebno je preformulirati jednadžbu (2.3):

$$I = P\xi = \frac{P^2}{Z} \quad (2.7)$$

Gdje je I intenzitet zvuka (SPL), P akustični tlak te je ξ brzina čestica. Uobičajeno je da se jačina zvuka ne definira kao intenzitet već kao omjer β , gdje je dB u odnosu na minimalan zvučni prag, najmanji zvuk koji čovjek može čuti jednak $P_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$. U stvarnosti, ovaj je prag funkcija frekvencije kao što je opisano u Fletcher-Munsenovoj krivulji, sa vrhuncem osjetljivosti između 2 i 4 kHz [10].

Referentna vrijednost zvučnog intenziteta I_0 može se odrediti iz P_0 koristeći

$$I_0 = \frac{P_0^2}{Z} = \frac{(2 \cdot 10^{-5})^2}{400} = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (2.8)$$

Omjer je dakle

$$\beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (2.9)$$

Tablica 6. daje uvid u relativne razine nekih uobičajenih zvukova. Pokazuje nam da se slušni raspon normalne osobe proteže od 0 pa sve do 120 dB, sa pragom boli za 10 dB višim od ovog. Ono što je zaista nevjerojatno je kako domet ljudskog sluha seže kroz 12 redova veličine [10].

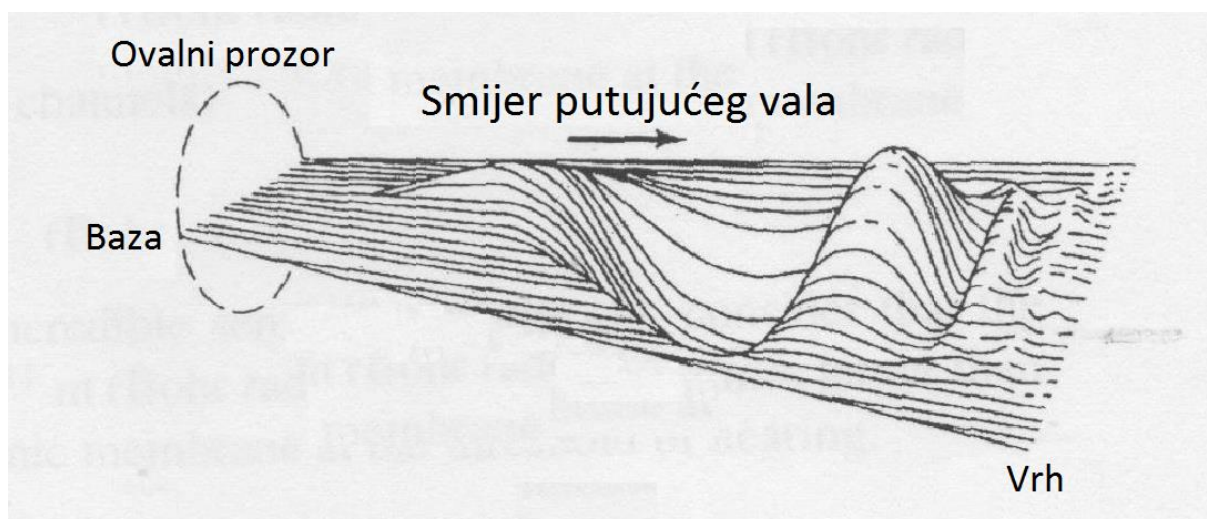
Tablica 6. Razine intenziteta zvuka [10]

Razina [dB]	Zvuk
13	Tok potoka
20-30	Kucanje sata, tiho šaptanje
40	Tihi ulični zvukovi
45-60	Normalan razgovor
70	Normalan promet grada ili autoceste
75	Usisavač
80	Sušilo za kosu

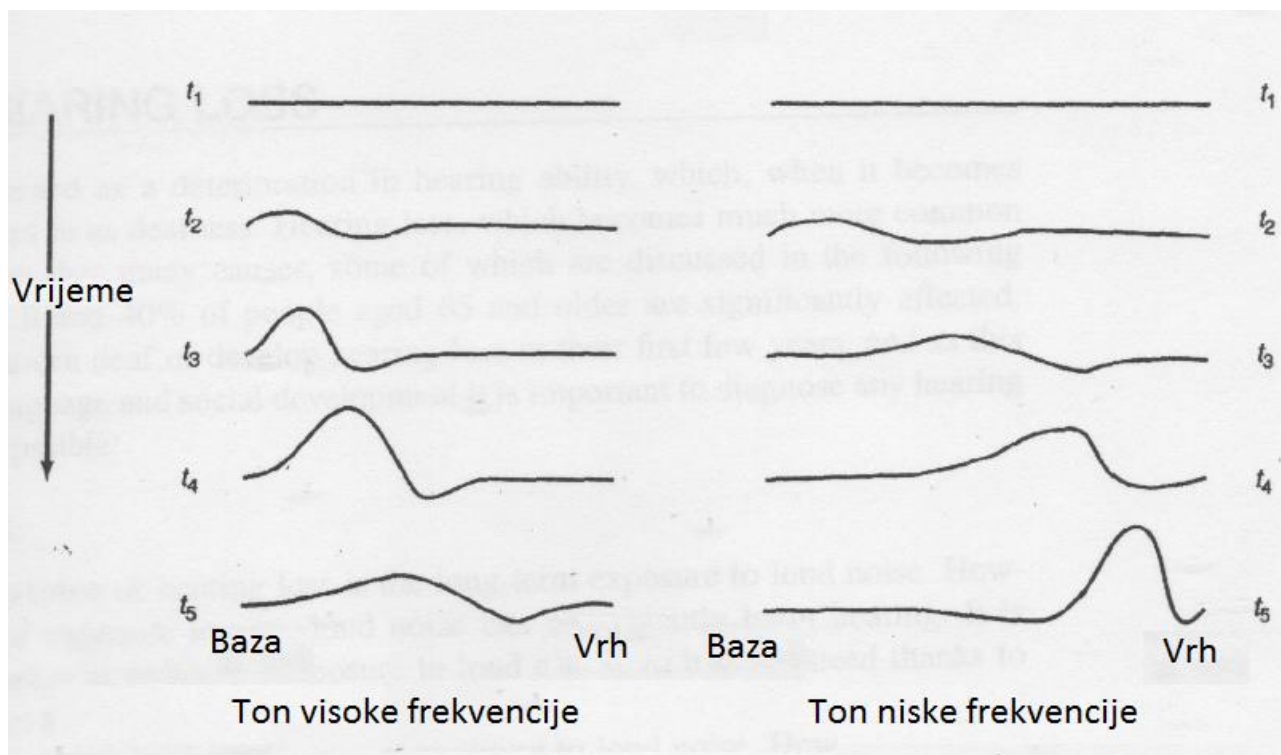
85	Motocikl, električni brijlač
90	Kosilica, teška oprema
100	Kamion za odvoz otpada
115	Plač djeteta
120	Polijetanje aviona na 30m
120-130	Trkaći auto, grmljavina, rock bend
130	Lansiranje rakete na 45m

2.4. Prijenos zvuka kroz uho

Ljudsko srednje uho, uključujući bubnjić i tri slušne košćice (čekić, nakovanj i stremen), je mehanički sustav za prijenos zvuka iz vanjskog u unutarnje uho. Zvuk koji ulazi u srednje uho kroz bubnjić započinje prijenosnu funkciju. Vibracije bubnjića uzrokuju pomak podnožja stremena, čime se stvara val u pužnici (Slika 10.). Na slici 11. je 2D prikaz tog istog vala za ton visoke i niske frekvencije. Amplituda vala će imati maksimalnu vrijednosti u različitim vremenskim periodima ovisno o njegovoj frekvenciji.



Slika 10. 3D prikaz putujućeg vala u bazilarnoj membrana pužnice [10]



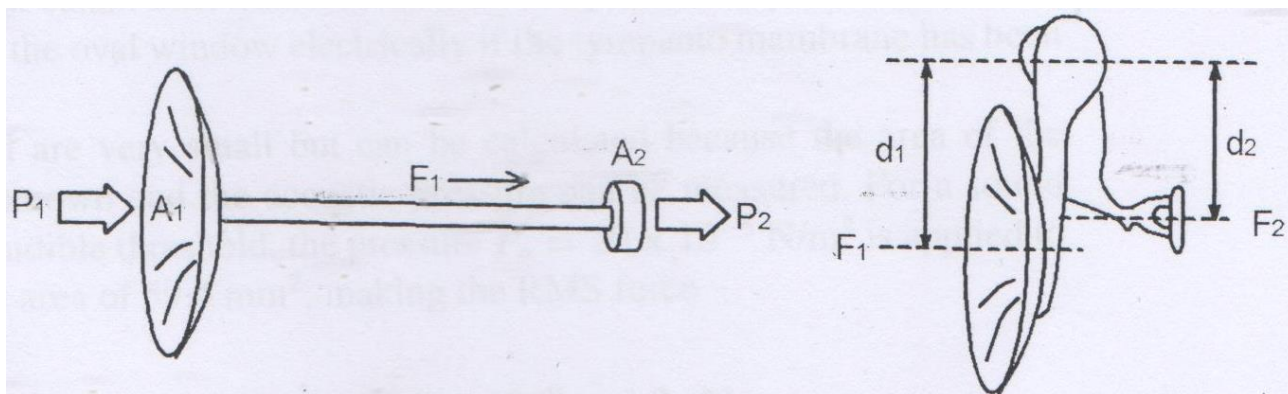
Slika 11.

2D prikaz odjeka za putujuće valove različitih frekvencija [2]

Držak čekića spojen je na bubnjić i mišić zatezač bubnjića, također spojenog na čekić, koji regulira napetost u bubnjiću. Mišić zatezač bubnjića smanjivanjem amplitude titraja bubnjića sprečava oštećenje unutarnjeg uha pri glasnim zvukovima. Nakovanj je spojen na čekić i na treću košćicu u lancu, stremen, koji je svojim podnožjem spojen na ovalni prozor pužnice. Stremeni mišić regulira domet kretanja stremena. Dva mišića (mišić zatezač bubnjića i mišić stremena) namještaju amplitudu osjetljivosti uha i oni su ključni u postizanju njenog nevjerojatnog dinamičkog dometa kao i u smanjivanju amplitude naših vlastitih glasova dok govorimo.

U prošlom poglavlju pokazano je kako se samo mali djelić akustične snage prenosi od zraka kroz tekućinu zbog velike razlike u njihovim relativnim akustičnim impedancijama ($T_{dB} = 10 \log_{10} 0,0011 = -29,6 \text{ dB}$) osim ako se impedancije na neki način poklapaju.

Srednje uho pretvara promjene u tlaku zraka u promjene u tlaku tekućine u srednjem uhu (tekućina pužnice). Ova promjena impedancije omogućena je zbog anatomije i mehanike srednjeg uha, s primarnom promjenom relativnih površina bubnjića i podnožja stremena kao što je prikazano na slici 12.



Slika 12. Mehанизmi koji povećavaju tlak zvuka [10]

Na slici 12, sila F_1 ostaje nepromijenjena ali poprečni presjek se smanjuje od A_1 (područje bubnjića) do A_2 (područje podnožja stremena), dakle

$$F_1 = P_1 A_1 = P_2 A_2 \quad (2.10)$$

Gdje F_1 predstavlja silu na bubnjić, P_1 zvučni tlak na membrani bubnjića te je P_2 zvučni tlak na podnožje stremena.

Što povećava zvučni tlak na ovalnom prozoru u omjeru dva poprečna presjeka

$$P_2 = P_1 \frac{A_1}{A_2} \quad (2.11)$$

Na slici 12. desno efekt poluge se izračunava tako da se računa moment oko osi rotacije na glavi čekića

$$F_1 d_1 = F_2 d_2 \quad (2.12)$$

što čini izlaznu silu F_2

$$F_2 = F_1 \frac{d_1}{d_2} \quad (2.13)$$

Kod čovjeka površina bubnjića iznosi $A_1 = 60 \text{ mm}^2$, dok je površina podnožja stremena $A_2 = 3,2 \text{ mm}^2$. To uzrokuje povećanje tlaka od

$$G_{area} = 20 \log_{10} \frac{60}{3,2} = 25,5 \text{ dB} \quad (2.14)$$

Drugi učinak je postignut s malim smanjenjem pomicanja ovalnog prozora u usporedbi s bubnjićem jer je držak čekića d_1 otprilike 1,3 puta duži od poluge nakovnja d_2 . Ovo omogućava povećanje sile i u konačnici povećanje tlaka od

$$G_{\text{lever}} = 20 \log_{10} 1,3 = 2,3 \text{ dB} \quad (2.15)$$

Zajedno, ovi učinci omogućavaju povećanje tlaka od $G = 27,8 \text{ dB}$. Za normalan prijenos zvuka na razmjerno niskim frekvencijama, koščice se ponašaju kao kruto tijelo, a ovalna ploča stremena kao klip koji se gura kroz ovalni prozor. Funkcija prijenosa za sustav opisuje vezu između akustičnog ulaznog tlaka na bubnjiću i izlaznog tlaka koji djeluje na podnožje čekića. Ova funkcija prijenosa važna je za proteze koje pokreću koščice ili ovalni prozor električno ako je bubnjić uništen.

Jedan od ciljeva mog rada je bio izračunati sile u ovalnoj ploči stremena za minimalni prag čujnosti i normalnu razinu govora od 60 dB . Spomenute sile su jako male, ali se mogu izračunati jer je poznata površina bubnjića i akustični se tlak može izmjeriti. Za zvučni signal minimalnog zvučnog praga, tlak $P_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$ se primjenjuje na područje bubnjića od 60 mm^2 , što čini efektivnu vrijednost sile

$$F_1 = P_0 A = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 60 \cdot 10^{-6} = 1,2 \text{ nN} \quad (2.16)$$

Kad vrijednost F_1 uvrstimo u formulu (2.13) i ako uzmemo u obzir da je držak čekića d_1 otprilike 1,3 puta duži od poluge nakovnja dobivamo silu na ovalnoj ploči stremena:

$$F_2 = F_1 \frac{d_1}{d_2} = F_1 \frac{1,3d_2}{d_2} = 1,3F_1 = 1,3 \cdot 1,2 = 1,56 \text{ nN} \quad (2.17)$$

Za normalne razine govora od 60 dB iznad minimalnog zvučnog praga, zvučni tlak naraste na $P = 0,025 \text{ N/m}^2$, a sila naraste na

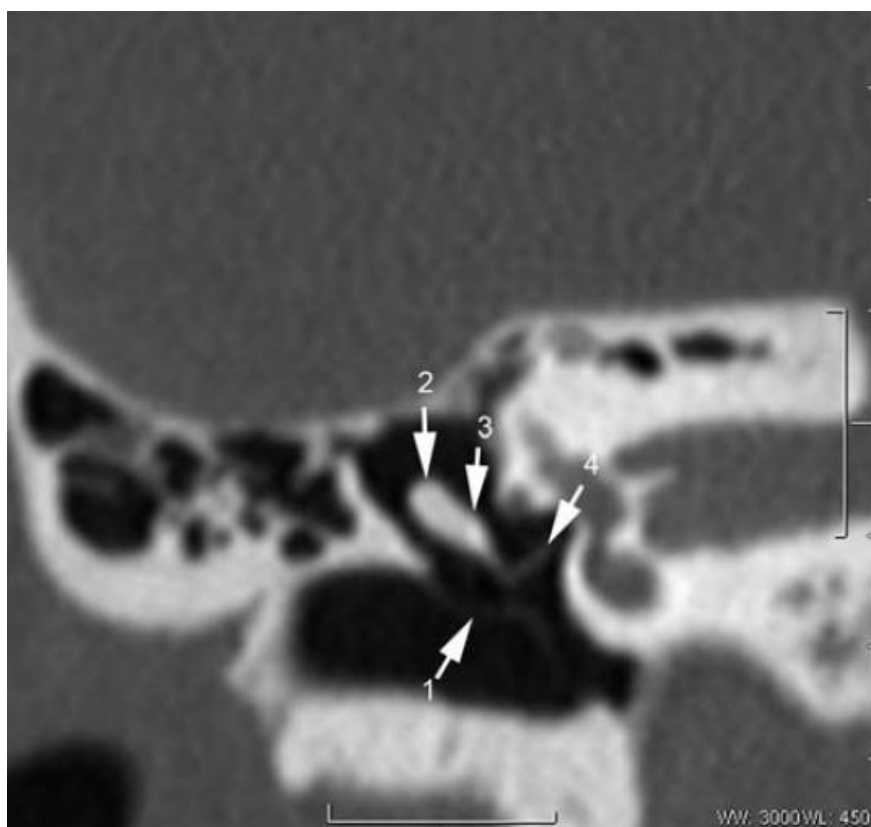
$$F'_1 = PA = 0,025 \cdot 60 \cdot 10^{-6} = 1,5 \text{ nN} \quad (2.18)$$

$$F'_2 = 1,3 \cdot F'_1 = 1,95 \text{ nN} \quad (2.19)$$

Neoštećeno uho nevjerovatno je osjetljivo, sa pragom sluha jednakim udaljenosti od samo 10^{-11} m od bubnjića. To može omogućiti dinamički raspon od 120 dB zvučnog tlaka prije nego dođe do oštećenja.

3. ANALIZA SREDNJEG UHA POMOĆU METODE KONAČNIH ELEMENATA

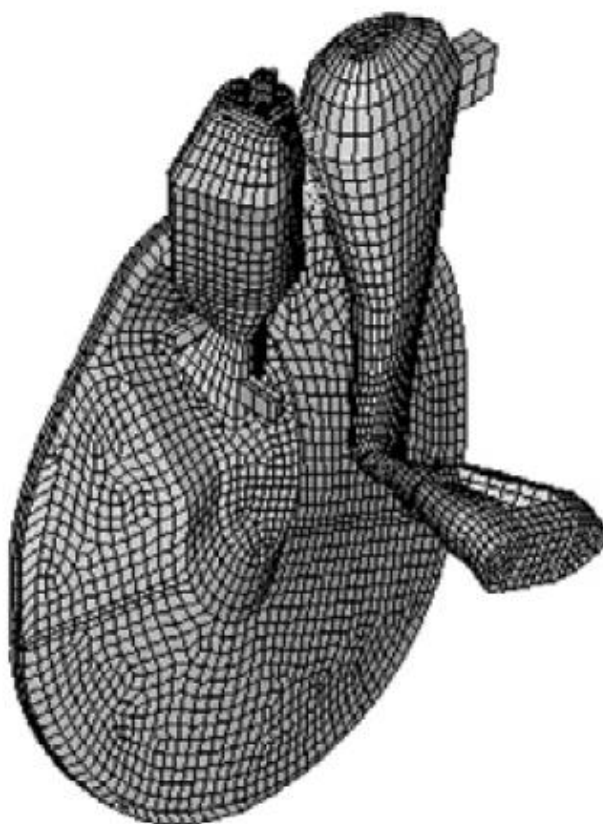
Danas je gotovo nezamislivo raditi bilo kakvu konstrukciju ili analizu bez pomoći računala i pripadajućeg alata. Točan 3D geometrijski model je nužni uvjet za vizualnu percepciju prostorne strukture ljudskog srednjeg uha i za buduća morfološka istraživanja. Metoda konačnih elemenata je računalni alat za simulacije koji se koristi u strojarskim i biomehaničkim analizama. Postupak koristi Ritzovu metodu numeričke analize i minimizaciju varijacijskog računa da bi se dobila približna rješenja vibracijskih sustava. Istraživanja na rekonstrukciji geometrije srednjeg uha objavljena su u više radova [11]. Prvi pokušaji rekonstrukcije geometrije slušnih košćica koristeći metodu konačnih elemenata rađeni su na mačkama. Kasnije su napravljeni modeli srednjeg uha koristeći slike sljepoočne kosti. Međutim, uzorci su morali biti dekalcirani prije riskantnog seciranja i stavljanja dijelova na staklo mikroskopa. Razvoj tomografije visoke rezolucije (HRCT) (Slika 10.) omogućilo je izvođenje digitalnog seciranja uzorka umjesto prijašnjeg fizičkog te su pomoću računala napravljeni vjerodostojni matematički 3D modeli.



Slika 13. HRCT slika ljudske sljepoočne kosti uključujući bubnjić (1) i slušne košćice: čekić (2), nakovanj (3) i stremen (4) [11]

3.1. Postupak konstruiranja 3D modela

Postupak konstruiranja 3D modela srednjeg uha je složen i odvija se u više faza. Prije HRCT slikanja potrebno je pregledati ispitanika i uvjeriti se da ima zdravo srednje uho. U slučaju oštećenog srednjeg uha dobit ćemo drugačiji 3D model. Takvi modeli se mogu koristiti jedino ako već imamo model zdravog srednjeg uha te želimo utvrditi obujam oštećenja uha ispitanika. Nakon HRCT slikanja potrebno se konzultirati sa otorinolaringologom i radiologom radi provjere kvalitete i točnosti slike. Tek onda je moguće slike prebaciti u računalno gdje se mjere dimenzije dijelova srednjeg uha. Radi preglednosti korisno je te podatke upisati u tablicu. Na temelju izmjerenih dimenzija i slika konstruira se odgovarajući 3D model u programima za 3D analizu (npr. Abaqus, Patran, ANSYS). Dimenzije i položaj nekih ligamenata i mišića srednjeg uha (npr. mišić zatezač bubnjića) nije moguće utvrditi iz HRCT slika te se oni određuju iz knjiga o anatomiji. Za analizu potrebni su nam i podaci o mehaničkim svojstvima dijelova srednjeg uha koje također uzimamo iz raznih literatura, a navedeni su i u tablici 5. Nakon toga potrebno je napraviti mrežu konačnih elemenata, izabrati oblik konačnih elemenata te odrediti rubne uvjete za postojeći model srednjeg uha. Ovaj korak je jako važan i o njemu će ovisiti kvaliteta dobivenih rezultata. Ako se rubni uvjeti postave krivo ili ako se napravi loša mreža konačnih elemenata mogu se dobiti rezultati koji nisu ni približno točni zato je na rezultate potrebno gledati kritički te ih usporediti sa podacima dobivenim klasičnim metodama.



Slika 14. 3D model slušnih košćica srednjeg uha sa mrežom konačnih elemenata [11]

Da bi se odredile vibracije strukture za različite frekvencije koristi se jednačba

$$\mathbf{M} \frac{d^2 u}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{du}{dt} + \mathbf{K} u = f + fs \quad (3.1)$$

gdje je \mathbf{M} matrica mase, \mathbf{C} matrica prigušenja, \mathbf{K} matrica krutosti, u vektor pomaka, f nodalni vektor sile i fs je vektor tlaka fluida koji opisuje interakciju fluida i bubnjića.

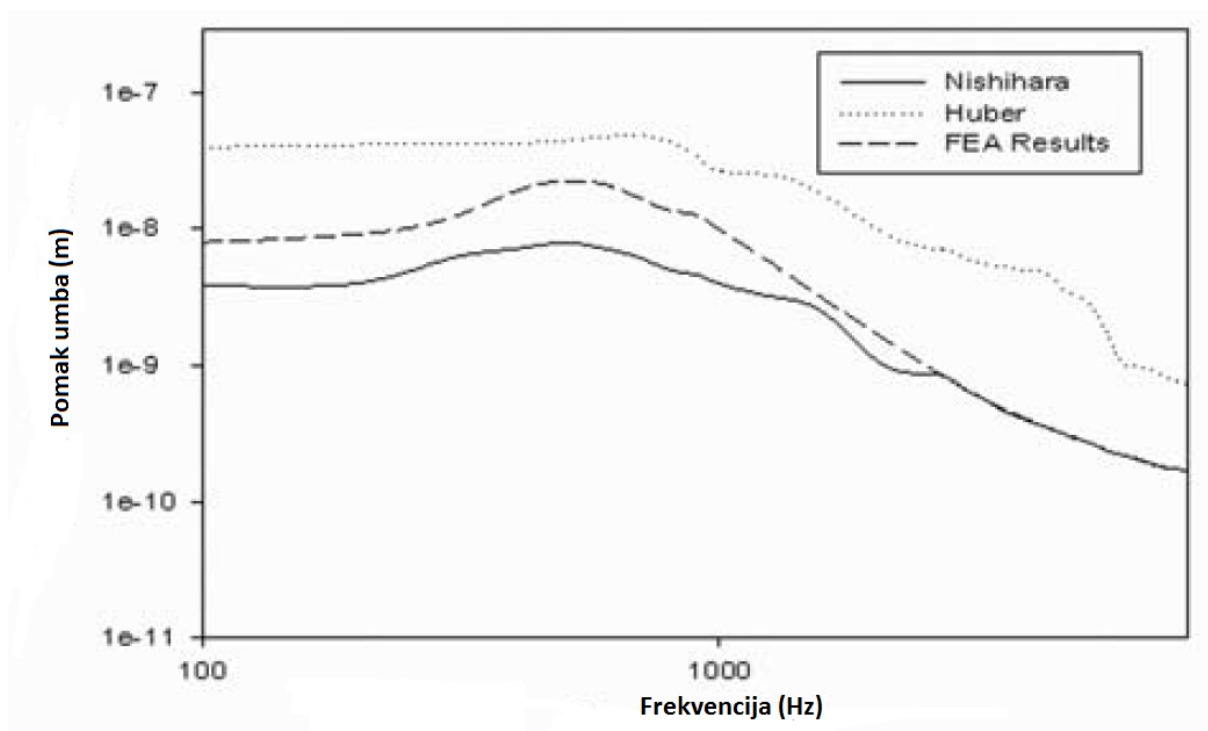
Fizikalna svojstva bubnjića i srednjeg uha uzimaju se iz tablice 5. Za periferiju bubnjića se pretpostavlja da je povezana sa koščatim zidom ušnog kanala, 0,2 mm širok i 0,2 mm debljine, sa modulom elastičnosti od $6 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$. Poissonov koeficijent se pretpostavlja 0,3 za sve elemente srednjeg uha. Matrica prigušenja za pune i šuplje elemente računa se formulom

$$[\mathbf{C}] = \alpha [\mathbf{M}] + \delta [\mathbf{K}] \quad (3.2)$$

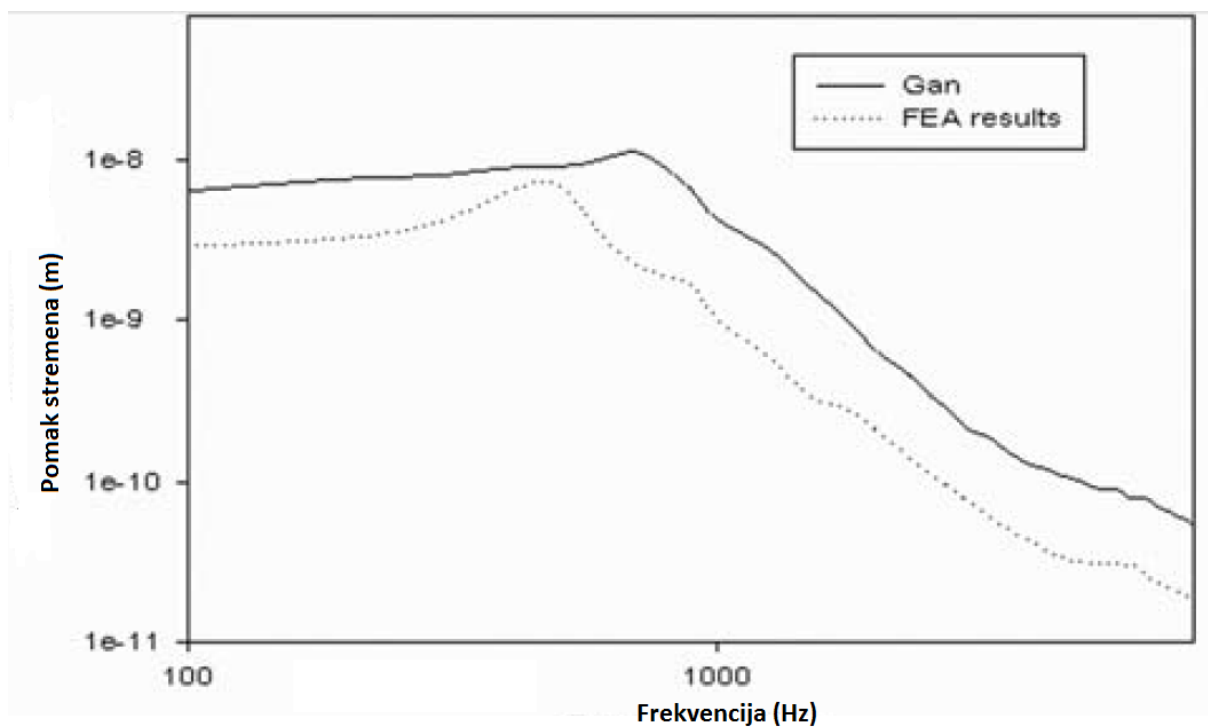
Gdje je $[\mathbf{C}]$ matrica prigušenja, $[\mathbf{M}]$ matrica mase i krutosti za elemente punog poprečnog presjeka, $[\mathbf{K}]$ matrica mase i krutosti za elemente šupljeg poprečnog presjeka, a α i δ parametri prigušenja. Čekić, bubnjić i njihovi spojevi su spojeni sa odgovarajućim čvorovima konačnih elemenata. Pretpostavlja se da je fluid u pužnici viskoelastičan. Krutost podnožja stremena se postiže s opružnim elementima jednako raspodjeljenim po periferiji podnožja. Opruge su okomite na periferiju podnožja stremena. Impendancija fluida pužnice se smatrala kao viskozno prigušenje. Konačno, pomaci podnožja stremena i vrha čekića uzrokovani zvučnim tlakom računaju se metodom konačnih elemenata kroz raspon frekvencija (npr. od 100 do 8000 Hz) [11]. Naizmjenično podešavanje je postupak za utvrđivanje dodatnih parametara modela uspoređujući pomake donjeg dijela bubnjića i podnožja stremena metodom konačnih elemenata s eksperimentalnim podacima istraživanja ljudske sljepoočne kosti. Zadatak postupka je da se umanju razlika modela konačnih elemenata sa eksperimentalnim podacima, tako da se označe potrebni podaci koje još nismo izračunali na modelu konačnih elemenata. Podaci o pomacima donjeg dijela bubnjića i podnožja stremena, dobiveni zvučnim tlakom na bubnjiću, koriste se da bi se dobili nepoznati parametri konačnog modela koristeći postupak naizmjeničnog podešavanja.

3.2. Rezultati analize

Slika 14. prikazuje 3D model koščica srednjeg uha. Taj model ne samo da aproksimira stvarnu biostrukturu nego i olakšava prebacivanje modela u odgovarajući oblik za različite software. Slike 15. i 16. prikazuju usporedbu rezultata jedne analize konačnih elemenata s klasičnim metodama te pokazuje da nema većih odstupanja između ove dvije metode. Prikazani rezultati rađeni su na više ljudi te se tako dobije skupina podataka s kojima se napravio 3D model. Ne smije biti vidljivih odstupanja u geometrijskim dimenzijama između desnih i lijevih slušnih koščica ($p > 0,05$).



Slika 15. Usporedba rezultata metode konačnih elemenata s rezultatima eksperimenta za umbo bubnjića [11]



Slika 16. Usporedba rezultata metode konačnih elemenata s rezultatima eksperimenta za stremen [11]

Kod konstrukcije složenog modela (modela konačnih elemenata), oblik i pozicija slušnih košćica, bubnjića, ušnog kanala, šupljine srednjeg uha, ligamenata, mišića i tetiva igra veliku ulogu. Znanje o geometriji objekta koji proučavamo uvelike pomaže za kinematičku i dinamičku analizu eksperimentalnih podataka dobivenih iz raznih istraživanja. U mehanici srednjeg uha ovo znači da nam anatomija bubnjića i srednjeg uha mora biti dobro poznata. Prikazana metoda geometrijskog modeliranja omogućava znanstvenicima pristup geometriji srednjeg uha te su im olakšana daljna fizikalna istraživanja. Ova metoda omogućuje točnu procjenu anatomije srednjeg uha koristeći HRCT slike ljudske sljepoočne kosti. Veličina slike HRCT metode je oko $0,187 \times 0,187 \times 0,3 \text{ mm}^3$. Dakle, cijeli bubnjić se ne može lako rekonstruirati. Potrebno je spomenuti da je moguće napraviti slike srednjeg uha uz pomoć magnetne rezonancije. Magnetna rezonancija (MR) je napravljena tako da pružava jezgru vodika kojeg ima obilje u tijelu. Zbog razvoja MR-a, prostorna rezolucija slike se povećala, omogućavajući mikroskopska istraživanja struktura. Kao rezultat, tvrde kosti nemaju tako dobru sliku kao i meka tkiva. MR se može koristiti kao dodatak HRCT metodi.

Da bi potvrdili točnost modela, pomaci bubnjića i slušnih košćica dobiveni ovim modelom uspoređeni su sa podacima dobiveni mjerenjem eksperimentalnim putem. Oba dva pomaka su bila skoro konstantna do 8000 Hz i imali maksimalne vrijednosti oko 800-900 Hz [11]. Na frekvencijama zvuka preko 900 Hz pomak bi se smanjivao kako bi se povećavala frekvencija. Međutim, najveći pomaci pri 800-900 Hz u ovom modelu slažu se s onima dobivenim eksperimentalnim mjerenjima. Individualne razlike u pomacima umba bubnjića i podnožja stremena veće se na nižim frekvencijama i neke su sljepoočne kosti pokazale najveće amplitude pri rezonantnoj frekvenciji [12]. Dakle, smatra se da su gore spomenute razlike u dopuštenom odstupanju.

Zaključak je da su prikazane metode brze, jeftine, praktične i što je najvažnije neinvazivne za razliku od prijašnjih metoda i laserskih skeniranja. Model konačnih elemenata, koji je konstruiran koristeći stvarne geometrijske modele od računalom potpomognutim rekonstrukcija HRCT slika, je metodom naizmjeničnog uspoređivanja uspoređen sa podacima o pomaku srednjeg uha da bi se dobio završni model konačnih elemenata biomehanike srednjeg uha. Ove komparativne procjene pokazale su da se rezultati modela konačnih elemenata, uglavnom, poklapaju sa empirijskim rezultatima dobivenim laserskim metodama na ljudskim ispitanicima ili ljudskim sljepoočnim kostima. Preliminarna klinička upotreba modela konačnih elemenata pokazuje učinak mase implantata na slušne košćice i promjenu krutosti bubnjića. Ovi rezultati pokazuju da je model konačnih elemenata potencijalno koristan u istraživanjima biomehanike srednjeg uha i u konstruiranju i testiranju implantata srednjeg uha. Model konačnih elemenata srednjeg uha može se koristiti i u istraživanjima perforacije bubnjića, otoskleroze (bolest abnormalnog rasta slušnih košćica) te pasivne i aktivne funkcije implantata za sluh. Ako bi se konstruirao kompletni model srednjeg uha, prostorne varijacije pomaka na bubnjiću i 3D vibracije slušnih košćica mogle bi se saznati bez direktnih mjerenja, koje je teško izvesti. Bilo bi moguće saznati kako razne bolesti srednjeg uha utječu na njegovo funkcioniranje i razumjeti kako individualne razlike u strukturi srednjeg uha utječu na njegovu funkciju prije operacije. Model mora biti unaprijeđen u nekoliko aspekata kao što je određivanje točnijih rubnih uvjeta geometrije i mehaničkih

svojstava ligamenata i mišića, ograničenja fluida pužnice i akustičnih efekata slušnog kanala i šupljine srednjeg uha.

ZAKLJUČAK

Nakon što se detaljno analizira ljudsko srednje uho da se zaključiti da je to veoma složen sustav. U ovom radu je detaljno opisana geometrija srednjeg uha i način na koji ono procesira zvuk. Dimenzije srednjeg uha su jako malene te lako može doći do oštećenja, uz to razne bolesti nam mogu oštetiti sluh. Zbog toga je znanstvenicima vrlo teško napraviti umjetni sustav koji bi zamjenio funkciju srednjeg uha. Fascinantna je činjenica da se jačina sile koja je potrebna da se potreban pomak bubnjića na pragu sluha mjeri u nano njutnima. Isto tako pomaci bubnjića i slušnih koščica se mjere mikroskopski. Problem predstavlja i samo mjerenje dimenzija slušnih koščica koje je vrlo teško točno napraviti. Razvojem CAD sustava i metode konačnih elemenata danas je moguće napraviti 3D model srednjeg uha. Iz takvih modela moguće je napraviti analizu opterećenja, naprezanja i pokreta srednjeg uha. Dimenzije je potrebno usporediti i provjeriti sa dimenzijama dobivenim eksperimentalnim metodama. Također potrebno je razviti tehnologiju kojim bi se takav impantat izradio i mogao ugraditi u čovjeka. Na tržištu postoje razni impantati, ali u bliskoj budućnosti zbog već navedenih razloga možemo očekivati sve bolje proizvode.

4. LITERATURA

- [1] <http://www.proscubadiver.net/wp-content/uploads/2011/04/Ear.jpeg>, travanj 2014.
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Pinna_\(anatomy\)#mediaviewer/File:Gray904.png](http://en.wikipedia.org/wiki/Pinna_(anatomy)#mediaviewer/File:Gray904.png), lipanj 2014.
- [3] Ž. Bumer, V. Katić, M. Nikšić-Ivančić, B. Pegan, V. Petric, N. Šprem i suradnici, Otorinolaringologija, Naklada Ljevak, Zagreb, 2004.
- [4] <http://www.audiologs.com/ozrenbilan/Image140.jpg>, lipanj 2014.
- [5] <http://www.entconsent.co.uk/ENTcons/images/middle%20ear.jpg>, lipanj 2014.
- [6] Q. Sun, R. Z. Gan, K.-H. Chang, K. J. Dormer, „Computer-integrated finite element modeling of human middle ear“, Biomechanic and modeling in mechanobiology, pp. 109-122, 2002.
- [7] <http://images.radiopaedia.org/images/22662/813fede72b038041fc3bbfb02f31d5.jpg>, kolovoz 2014.
- [8] http://etc.usf.edu/clipart/54100/54122/54122_incus_lg.gif, kolovoz 2014.
- [9] <http://audilab.bmed.mcgill.ca/~funnell/sprojects3d/oto3d/stapes.gif>, kolovoz 2014.
- [10] G. M. Brooker, Introduction to Biomechatronics, Sci tech Publishing, Raleigh, 2012.
- [11] C.-F. Lee, P.-R. Chen, W.-J. Lee, J.-H. Chen, T.-C. Liu, Computer aided three-dimensional reconstruction and modeling of middle ear biomechanics by high-resolution computed tomography and finite element analysis, Taipei, 2006.
- [12] H. Arimoto, Ossicular vibration in human temporal bones, J Otol Rhinol Laryngol Soc Japan, 1989.